

Modèle d'impact de gouttes chaudes sur un substrat solide froid

Khalid FATAOUI^{12*}, Bernard PATEYRON¹, Mohammed EL GANAOU¹

¹ Université de Limoges, SPCTS UMR6638, CNRS 123, av. Albert Thomas 87060 Limoges, France

² Université Chouaib Doukkali, Faculté des Sciences, 24000 El Jadida, Maroc.

*(auteur correspondant: khalid.fataoui@etu.unilim.fr)

Résumé:

Les particules projetées par plasma d'arc sont généralement de taille micrométrique (comprises en général entre 10 et 100 μm) en projection conventionnelle et leur vitesse d'impact s'étend de 50 à 350 m/s. Les temps caractéristiques pour la formation d'une lamelle sont de l'ordre de la microseconde : moins de 5 μs pour la durée d'étalement de la particule fondue avec une solidification qui peut commencer avant la fin de l'étalement et se poursuit en général entre 0,8 et 10 μs après l'impact, et. [11]. Il s'agit ici d'étudier numériquement le couplage complexe par un modèle qui sera validé en comparaison avec des résultats d'étalement de particules de grande taille et à faible vitesse d'impact (<1 m/s).

Nomenclature

Symboles *latins*

C_p	capacité calorifique $J.kg^{-1}.K^{-1}$
g	accélération de la pesanteur $(9.81) m.s^{-2}$
L	chaleur latente, $J.kg^{-1}$
K	conductivité thermique $W.m^{-1}.K^{-1}$
R_{th}	résistance thermique de contact $(m^2.K/J)$
T	température, (K)
V	vitesse $m.s^{-1}$

Symboles *grecs*

Φ	fonction de phase
σ	tension superficielle, $N.m^{-1}$
μ	viscosité dynamique $Pa.s$
δ	masse volumique $kg.m^{-3}$
	fonction Dirac

Indices et exposants

f	Front de changement de phase
s	solide
l	liquide

1. Introduction

Ce modèle simplifié est fondé sur les équations de Navier-Stokes, pour décrire l'écoulement et une équation supplémentaire prend en compte la tension superficielle et explique l'angle de contact. L'écoulement du fluide est supposé newtonien, et celui de la goutte est considéré incompressible. La seule tension s'appliquant à la surface libre est considérée comme normale à celle-ci. Les équations sont discrétisées par éléments finies. La déformation libre de l'interface est suivie par une fonction de niveau ϕ utilisée pour déterminer la densité et la viscosité de part et d'autre de la surface adjacente séparant la gouttelette ($\phi = 1$) et l'atmosphère environnante ($\phi = 0$).

Les données des particules à l'impact (température et des vitesses pour un diamètre donné) sont issues du modèle de *Jets&Poudres* [1] pour des conditions usuelles de projection de particules de zircone en jet de plasma.

2. Modèle dynamique

Par application du principe fondamental de la dynamique, le bilan des forces au sein de chaque fluide newtonien exprime la vitesse u en fonction des paramètres du système :

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + \nabla \cdot (uu) \right) = -\nabla p + \rho g + \nabla (\mu \nabla u + \nabla u^T) + F_{TS}$$

$$\nabla u = 0 \quad (1)$$

où ρ et μ sont respectivement la masse volumique et la viscosité du fluide, g l'accélération de la pesanteur. Le terme F_{TS} représente les forces de tension de surface, il est lié au concept d'interface entre deux fluides non miscible. Cette force est représentée par

$$F_{TS} = \sigma \cdot k \cdot \delta \cdot n_i \quad (2)$$

où σ , k et δ sont respectivement le coefficient de tension superficielle, la courbure moyenne locale de l'interface et la fonction de Dirac.

Le modèle choisi ici est du type modèle à un fluide. En effet ce modèle s'adapte bien à la discrétisation sur maillage fixe cartésien. Ce type de modèle a été utilisé par plusieurs auteurs pour simuler la déposition sur substrat sec [2,3] ou l'impact sur film liquide [4]. Il convient de définir une fonction qui détermine géométriquement la position des phases dans le domaine. Soit la fonction de phase ϕ définies par ($\phi = 1$ dans la zone contenant le fluide 1, $\phi = 0$ dans la zone contenant le fluide 2 et $0 < \phi < 1$ dans la zone d'interface entre les deux fluides

La fonction phase ϕ se déplace en fonction de la vitesse de l'interface u . Cette évolution est décrite par l'équation cinématique qui relie la fonction à la vitesse de l'interface u :

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + u \nabla \phi = 0 \quad (3)$$

Une propriété physiques λ des milieux s'expriment en fonction de la présence de chaque fluide par :

$$\lambda = \lambda_1 + (\lambda_2 - \lambda_1) \phi \quad (4)$$

3. Modèle thermique

Le milieu qui change de phase est représenté comme deux domaines séparés par une interface qui est le front de solidification. L'évolution de température de chaque milieu est résolue séparément, l'interface correspond à une condition dite de Stefan, définie par la conservation des flux à l'interface :

$$k_s \nabla T_s n - k_l \nabla T_l n = \rho L_f V_f n \quad (5)$$

l et s représentent respectivement les phases liquide et solide et V_f est la vitesse du front de solidification. La difficulté de cette méthode réside dans la nécessité de déterminer la position du front de solidification, ce qui est souvent effectué soit par la méthode de Landau sur un maillage évolutif [3,6] soit sur maillage fixe en prenant en compte implicitement la condition de Stefan (méthode enthalpique).

4. Validation du modèle à différentes vitesses d'impact

Il n'existe pas de formulations analytiques qui permettent de décrire avec précision l'évolution d'impact et de l'étalement d'une goutte, pour valider la simulation de l'impact de gouttes, nous avons donc comparé les résultats obtenus avec ceux de la référence [7]. En outre nous avons utilisé la formule analytique [8] afin de comparer le degré d'étalement maximal obtenu ξ_{\max} , défini comme le rapport entre le diamètre maximal de la gouttelette étalée et le diamètre initial de la goutte).

$$\xi_{\max} = \sqrt{\frac{w_e + 12}{3(1 - \cos \theta) + 4(w_e / \sqrt{R_e})}} \quad (6)$$

avec W_e et R_e respectivement les nombres de Weber et de Reynolds d'impact, et θ est l'angle de contact statique.

Considérons en coordonnées cartésiennes 2D axisymétrique l'impact d'une goutte sur un substrat. L'axe de la goutte est une condition limite de type symétrie afin de réduire le

domaine d'étude ainsi que le temps de calcul et la taille mémoire. La condition aux limites à l'interface goutte-substrat est une condition de non glissement (figure 1).

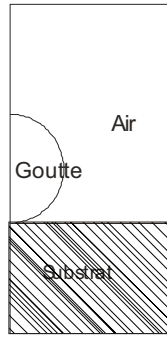


Figure 1 : Géométrie du système étudié

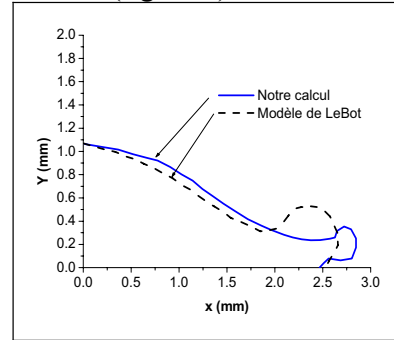


Figure 2 : Etalement de la goutte à l'instant $t = 0.01 \text{ s}$

La simulation numérique est réalisée pour l'impact d'une goutte d'indium de 2mm de diamètre, de vitesse initiale de $0,1 \text{ m.s}^{-1}$ et dont les caractéristiques sont résumées sur le tableau suivant :

Tension de surface ($N.m$)	Viscosité ($Pa.s$)	Masse volumique ($kg.m^{-3}$)	Nombre de Reynolds Re	Nombre de Weber We
0.005	$1.35 \cdot 10^{-3}$	7300	1081	29

Le pas de temps utilisé est constant $\Delta t = 5 \cdot 10^{-6} \text{ s}$. Les équations de Navier-Stokes en écoulement incompressible sont résolues par la méthode de Lagrange, et l'équation d'advection par la méthode 'level set'.

Dans la simulation présentée ici le degré d'étalement maximum de la goutte est de l'ordre de $\xi_{\max} = 2.11$. Dans la simulation de Lebot [3] le degré d'étalement maximum de la goutte atteint une valeur de $\xi_{\max} = 2.17$, soit un écart relatif de 2.7%, alors que l'expression analytique propose un degré d'étalement de $\xi_{\max} = 2.07$, ce qui donne donc un écart relatif de 1.9% (à noter que Pasandideh-Fard et al. [2] argumentent une dispersion des résultats inférieure à 15%).

La comparaison de deux modèle a été faite aussi par la fonction de phase ϕ (l'interface entre la goutte liquide et l'air), la figure 2 montre les résultats des deux modèles à l'instant $t = 0.01 \text{ s}$. Pour les faibles vitesses les résultats sont donc cohérents avec ceux de Lebot [7], et des expressions analytiques [8].

Pour les grandes vitesses ($>100 \text{ m/s}$), nous avons comparé les résultats du modèle proposé avec ceux obtenus par Mauro Bertagnolli et al [9]. La simulation numérique réalisée correspond à l'impact d'une particule de zircone de $20 \mu\text{m}$ de diamètre et de température initiale 3400 K , et animée d'une vitesse de 180 m.s^{-1} à l'impact. Les caractéristiques de cette goutte sont données sur le tableau suivant :

Tension de surface ($N.m$)	Viscosité ($Pa.s$)	Masse volumique ($kg.m^{-3}$)	La chaleur spécifique ($J/Kg.K$)	Conductivité thermique ($W/m.K$)	Température de fusion (K)
0.5	$42 \cdot 10^{-3}$	5550	500	2	2930

La Figure 3, compare l'étalement de la goutte de zircone dans le modèle proposé et dans celui de Mauro Bertagnolli. L'étalement et la forme de la goutte sont semblables au cours de l'impact. À l'instant $t = 0.5 \mu\text{s}$, la goutte se stabilise et prend la forme de l'étalement final.

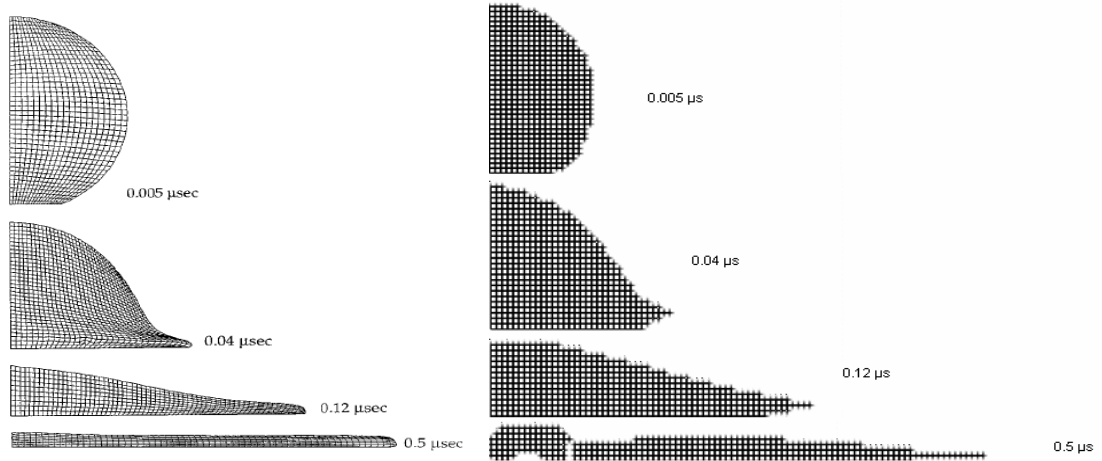


Figure 3: Etallements avec maillage de la goutte de zircone
a) [Mauro Bertagnolli], b) le modèle présenté.

Les paramètres utilisés dans cette validation sont celles traités par Madejski [8], et Mauro Bertagnolli [9], et Yoshida [10]. Le modèle de Madejski est fondé sur l'hypothèse d'une déformation cylindrique de la goutte, le degré d'étalement maximum (équation 6) est alors estimé par :

$$\xi = MR_e^{0.2} = M \left(\frac{\rho V d}{\mu} \right)^{0.2} \quad (7)$$

Selon Madejski M est un coefficient constant égal à 1.2941 [8] alors que selon Yoshida et al. [10], M est égal à 0.925. Le modèle de Madejski surévalue légèrement relativement à celui de Yoshida. Les résultats du modèle présenté sont très proches de ceux obtenus par Mauro Bertagnolli [9]. Sur la (figure 4) sont représentés les taux d'étalement prédits par ces différents modèles. Dans le diagramme logarithmique la bande située entre les modèles Yoshida et de Madejski contient tous les résultats. En conséquence les résultats de la simulation de l'impact d'une goutte sur un substrat à une grande vitesse, sont donc cohérents avec les calculs théoriques et avec les autres modèles que ce soit pour de petites ou de grandes vitesses.

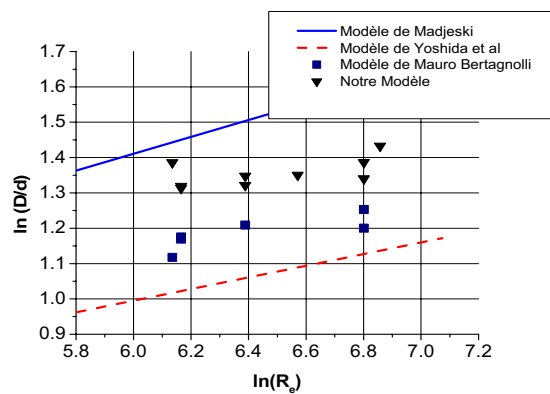


Figure 4 : Degré d'étalement en fonction du nombre de Reynolds

5. Exploitation du modèle proposé pour des gouttes de zircone fondue à grandes vitesses d'impact.

En projection plasma, le comportement de particules fondues à l'impact est l'élément fondamental pour comprendre la microstructure de la couche résultante. En effet les couches

sont créées par l'empilement de lamelles formées par l'étalement et la solidification de gouttelettes individuelles fondues. Les particules projetées par plasma d'arc sont généralement de taille micrométrique (entre 10 et $100\ \mu\text{m}$) en projection conventionnelle et leur vitesse d'impact s'étend de 50 à $350\ \text{m/s}$.

Cette étude, est consacrée à une goutte de zircone préchauffée à $3500\ \text{K}$, et de $20\ \mu\text{m}$ de diamètre, projetée pour deux vitesses de $100\ \text{m.s}^{-1}$ et $150\ \text{m.s}^{-1}$ sur un substrat d'acier préchauffé à $700\ \text{K}$.

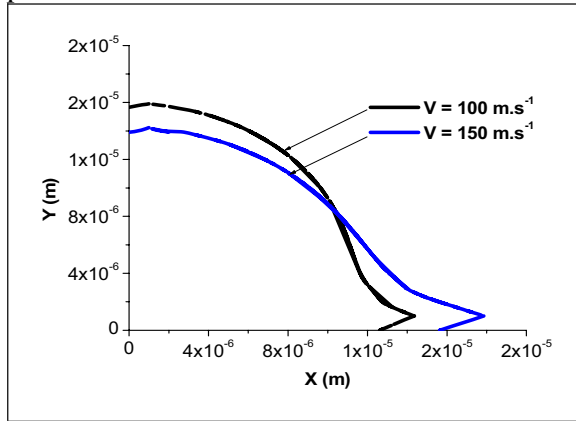


Figure 5: l'étalement de la goutte à l'instant $0.05\ \mu\text{s}$.

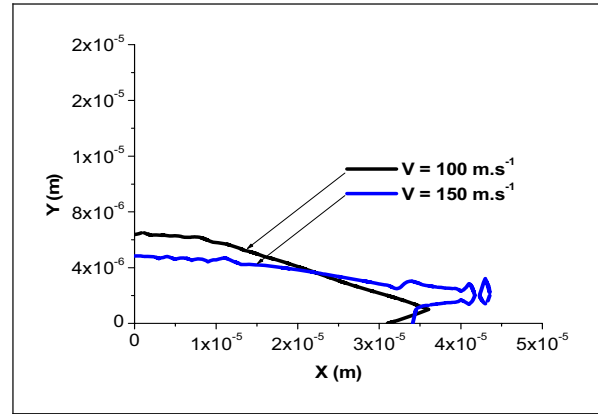


Figure 6: Etalement de la goutte à l'instant $0.3\ \mu\text{s}$.

Les figures 5 et 6 montrent différents instants de la modélisation de l'étalement de la goutte de zircone de $20\ \mu\text{m}$ sur le substrat avec plusieurs vitesses d'impact (100 , et $150\ \text{m.s}^{-1}$). La goutte s'étale d'autant plus que la vitesse est plus élevée. Elle s'étale et se solidifie sur le substrat d'acier dans un temps inférieur à $1\ \mu\text{s}$. A l'instant $t = 0.3\ \mu\text{s}$ des éclaboussures apparaissent à partir de la goutte animée d'une vitesse de $150\ \text{m/s}$, la rupture du fluide apparaît avec la naissance de gouttelettes secondaires éjectées parallèlement à la surface du substrat.

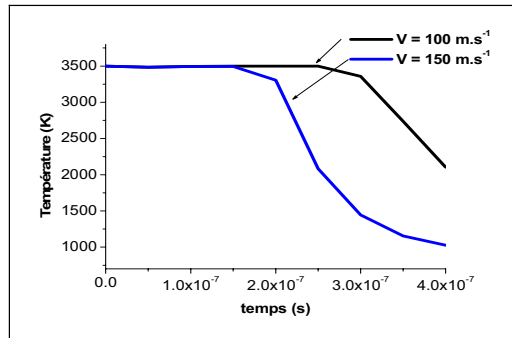


Figure 7: l'évolution de la température au point $X=0\ Y=5.e-5\text{m}$

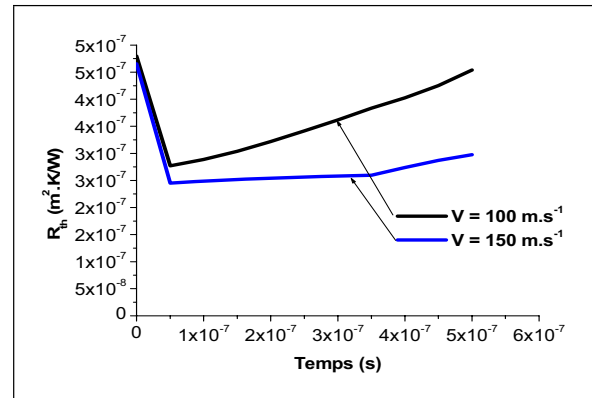


Figure 8: Evolution de la résistance thermique de contact.

Sur la Figure 7, il apparaît que la goutte de zircone se solidifie d'autant plus vite que la vitesse d'impact est plus grande. Cela semble imputable au temps d'étalement plus rapide qui augmente donc les échanges thermiques entre la goutte et le substrat. Ainsi l'augmentation de la vitesse d'impact influe directement sur le temps d'étalement de la goutte et sur le diamètre maximum atteint par la lamelle.

Lorsque le liquide s'écoule sur la surface il tend à suivre la forme de la surface. Plus cette dernière est rugueuse plus le liquide aura des difficultés à suivre ses formes. Ainsi le liquide qui s'écoule perpendiculairement à ces obstacles sera projeté verticalement grâce à son inertie.

Aux premiers instants qui suivent le contact de la goutte avec le substrat, la surface de contact et donc d'échange augmente rapidement et la résistance thermique de contact R_{th} diminue de 5.10^{-7} à $3.10^{-7} \text{ m}^2\text{K/W}$ (figure 8). Après étalement partiel, la surface de contact entre le substrat et la goutte augmente, alors que la température de la goutte reste quasi-constante. A ce moment, la température du substrat cesse de croître alors que la température de surface de la goutte s'abaisse, La résistance thermique de contact correspondante augmente pour atteindre un maximum à la fin de l'étalement. Ajoutons que pendant l'impact la goutte s'écrase sur la surface du substrat en générant une forte pression. La goutte liquide remplit toutes les cavités en surface du substrat, la résistance thermique de contact est minimum jusqu'à ce que la pression retombe, et alors la résistance thermique de contact augmente.

6. Conclusion

Le modèle 2D de l'impact de gouttelettes permet donc d'estimer de façon valide les grandeurs temporelles et dimensionnelles relatives aux phénomènes d'écrasement de gouttelette en cours de projection plasma. La solidification est prise en compte lorsque la goutte atteint une température inférieure à la température de fusion ce qui contribue à figer plus rapidement la matière et diminue l'énergie cinétique du système et en conséquence amortie la vitesse d'étalement. De nombreux auteurs supposent que la gouttelette s'écrase en surfusion. Il serait donc intéressant de poursuivre les investigations en tenant compte de la surfusion afin de la représenter correctement et de l'intégrer dans le code global. Les perspectives immédiates de ce travail sont relatives à la mise en place de la simulation 3D de l'impact de gouttes où les transferts sont couplés aux changements de phase.

Références

- [1] B. Pateyron et al <http://Jets.poudres.free.fr>
- [2] Pasandideh-Fard M., Mostaghimi j. (1996) "Droplet impact and solidification in a thermal spray process : droplet-substrate interaction", Thermal spray : Practical Solutions for Engineering Problems, C. C. Berndt (Ed.), Pub. ASM International, Material Park, Ohio-USA, p. 637-646.
- [3] C. Le Bot Thèse "impact et solidification de gouttes métalliques sur un substrat solide" 2003
- [4] D. Gueyffier S. Zaleski. Full Navier-Sokes simulation of droplet impact on thin liquid films de digitations lors de l'impact d'une goutte sur un film liquide. Third international conférence on Multiphase Flow, Lyon, France, p. 1-7, 1998.
- [5] D. Delaunay. "Transferts de chaleur par conduction associés à un changement de phase". Ecole d'été G.U.T: Transfert de chaleur et de matière avec changement de phase, p. 327-372, 1990.
- [6] D. Delaunay. "Etude du couplage convection naturelle - conduction avec changement de phase. Application au stockage périodique de l'énergie". Thèse de doctorat, Université de Nantes, 1985.
- [7] C. Le Bot, S. Vincent, E. Arquis. "Impact and solidification of indium droplets on a dry substrate". J. Thermal Sci., 2003.
- [8] Madejski J. (1976) "Solidification of droplets on a cold surface" Int. J. Heat Mass Transfer., 19, pp.1009-1013.
- [9] M. Bertagnolli, Thermomechanical Simulation of the Splashing of Ceramic Droplets on a Rigid Substrate JOURNAL OF COMPUTATIONAL PHYSICS 133, 205-221 (1997)
- [10] T. Yoshida, T. Okada, H. Hideki, and H. Kumaoka, Plasma Sources Sci. Technol. 1, 195 (1992).
- [11] J. Cedelle, Etude de la formation de lamelles résultant de l'impact de gouttes millimétriques et micrométriques : application a la réalisation d'un dépôt par projection plasma » université de Limoges, 2005.